

УДК 620.179

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.1.59042

Є.Ф. Суслов, В.С. Єременко, А.Г. Протасов, Ж.О. Павленко
Національний технічний університет України “КПІ”, Київ, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГІЛБЕРТА ДЛЯ ОТРИМАННЯ ДОДАТКОВИХ ІНФОРМАТИВНИХ ОЗНАК ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ ІМПЕДАНСНОМУ КОНТРОЛІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Background. The article is devoted to the problem of the information increasing for the impedance method of nondestructive testing. This method is one of the commonly used in aviation for testing honeycomb panels and sandwich structures made of composite materials.

Objective. The purpose of this article is to get for the pulsed impedance method of nondestructive testing the additional informative features which increase testing reliability of composite materials.

Methods. It was experimentally measured signals from defective and defectless areas of the test pattern. Utilization of the Hilbert transform gave possibility to determine phase characteristics of these signals and realize demodulation to extract a low-frequency envelope for further analysis of its shape.

Results. It was received the informative features as a result of researches. Among them are instantaneous frequency of a signal, the integral of a phase characteristic on the selected interval and the integral of a difference signal phase characteristics. In order to compare quality of the defect detection using selected parameters it was carried out evaluation of the testing result reliability for a product fragment made of a composite material.

Conclusions. The proposed informative features characterize a degree of phase characteristics difference and enable to increase general reliability of composite materials testing by the pulsed impedance method.

Keywords: impedance method of testing; Hilbert transform.

Вступ

Сучасну авіакосмічну галузь неможливо уявити без використання композиційних матеріалів (КМ). Технологічний процес виробництва композиційних елементів конструкцій літального апарата складний та чутливий до різноманітних помилок, що призводять до появи дефектів і неоднорідностей структури готового виробу. Часто дефекти матеріалу спричиняють зміни фізико-механічних характеристик виробу в цілому та зменшення його міцнісних показників нижче гранично допустимих рівнів. У процесі експлуатації літального апарата елементи його конструкції також зазнають впливу навколишнього середовища, розрахункових та непередбачуваних механічних навантажень, що призводять до зміни стану КМ.

Для неруйнівного контролю в авіабудівній галузі використовується велика кількість методів, кожен з яких має свої особливості та обмеження, обумовлені типами контрольованих матеріалів і геометричними характеристиками готових виробів. Одним із найбільш розповсюджених є акустичний імпедансний метод, що використовує вплив дефекту на зміну механічного імпедансу системи “об’єкт контролю—перетворювач” [1]. Він є одним із основних засобів неруйнівного контролю на території країн СНД та Європи, що використовується при кон-

тролі сандвіч-панелей зі стільниковим заповнювачем, багатошарових конструкцій, виконаних із полімерних КМ, металів та інших матеріалів і їх поєднань [2]. Імпедансний метод внесено до керівництв з технічної експлуатації низки літальних апаратів як базовий для періодичного контролю стільникових конструкцій на наявність відшарувань зовнішньої обшивки від стільникового заповнювача. Дефектоскопи на його основі пройшли міжвідомчі випробування, внесені до відомчих реєстрів авіаційних адміністрацій та рекомендовані для проведення контролю композитних агрегатів на транспортних і пасажирських літаках ІЛ-76, ІЛ-86, ІЛ-96-300, ТУ-204, ТУ-214, ЯК-42 та АН-124 “Руслан” [2, 3]. На літаках Airbus імпедансний метод застосовується як додатковий при контролі елементів на основі КМ зі стільниковим заповнювачем.

Зміна механічного імпедансу зони взаємодії між перетворювачем та об’єктом контролю впливає на амплітуду, фазу та частоту вихідного електричного сигналу. Крім того, відмінності фізико-механічних характеристик контрольованої зони можуть призводити до зміни форми обвідної інформаційного сигналу [1, 4]. Зазвичай у процесі контролю для визначення дефекту як інформативний параметр використовують амплітуду [5–7] або фазу сигналу [8–10]. У деяких випадках проводиться аналіз спектра цього сигналу [11, 12]. Як правило, при конт-

ролі імпедансним методом рішення про наявність пошкодження приймається при виході за допустимі межі лише одного параметра. У випадку аналізу спектра до уваги береться збільшення енергії сигналу в частотному діапазоні, найбільш чутливому до вибраного типу дефектів. Однак окремі параметри – амплітуда, фаза та частота – чутливі до різноманітних завад, що можуть збільшувати імовірність випадкових спрацювань [12]. Крім того, різні інформативні параметри мають різну чутливість до дефектів різного типу. Таким чином, актуальною є задача збільшення числа інформативних параметрів, що мають високу чутливість до можливих дефектів.

Постановка задачі

Одним із основних завдань при розробці методів і систем неруйнівного контролю є знаходження інформаційних параметрів сигналів, які несуть інформацію про технічний стан виробу. Метою роботи є отримання для імпульсного імпедансного метода неруйнівного контролю додаткових інформативних параметрів сигналів, які мають високу чутливість до дефектів та можуть підвищити достовірність контролю КМ. Для вирішення поставлених завдань пропонується використати перетворення Гілберта (ПГ).

Застосування перетворення Гілберта для аналізу інформаційних сигналів

Результатом ПГ дійсного сигналу $x(t)$, визначеного в часовій області, є його Гілберт-образ $\tilde{x}(t)$, що також визначений у часовій області [13]. Сума дійсного та отриманого сигналів $z(t) = x(t) + j\tilde{x}(t)$ являє собою так званий “аналітичний” сигнал $z(t)$. Беручи за основу $z(t)$, можна отримати амплітудну $A(t)$ обвідну вихідного сигналу $x(t)$ та його “миттєву” фазу $\theta(t)$ як функції часу.

Амплітудна обвідна та миттєва фаза можуть бути визначені на основі аналітичного сигналу $z(t)$:

$$z(t) = A(t)e^{j\theta(t)}.$$

Їх розрахунок відносно $x(t)$ реалізується таким чином:

$$A(t) = [x^2(t) + \tilde{x}^2(t)]^{\frac{1}{2}}$$

для обвідної та

$$\theta(t) = \arctg \left[\frac{\tilde{x}(t)}{x(t)} \right]$$

для миттєвої фази.

Миттєва частота інформаційного сигналу f_0 зв'язана з миттєвою фазою співвідношенням

$$f_0 = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \cdot \frac{d\theta(t)}{dt}.$$

Для оцінки можливості застосування ПГ для аналізу інформаційних сигналів імпульсного імпедансного метода було проведено експеримент, у ході якого на тестовому зразку КМ було отримано сигнали перетворювача із дефектної та бездефектної областей і засобами ПГ виділено з них обвідну, миттєву фазу та фазову характеристику.

На рис. 1 наведено реалізації сигналів та графіки їх миттєвих фаз із бездефектної та дефектної областей тестового зразка.

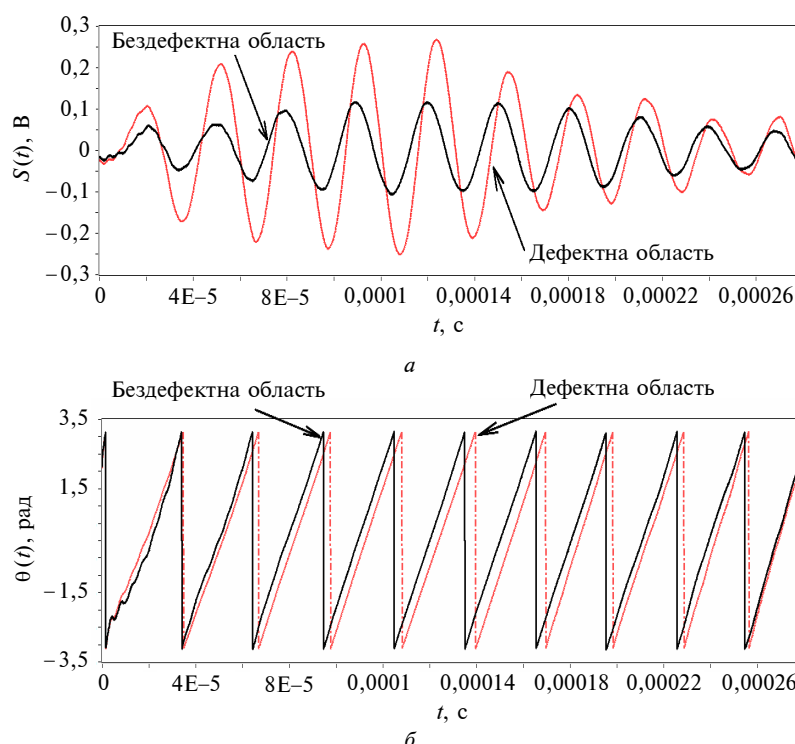


Рис. 1. Реалізація сигналів (а) та їх миттєві фази (б) із дефектної та бездефектної зон зразка

Як видно з рис. 1, зменшення несучої частоти призводить до зміни фазової характеристики сигналу. Використання миттєвої частоти сигналу як інформативного параметра має обмеження, пов'язане з вибором часового проміжку, на основі якого відбувається розрахунок. Наростання фазової характеристики сигналу має нелінійний характер, що пояснюється нерівномірністю відхилення миттєвої фазової характеристики поточного аналізованого сигналу. Як видно з рис. 1, б, максимальне відхилення між реалізаціями спостерігається на проміжку часу $[0-0,00022]$ с, після чого поступово зменшується. Максимум чутливості при використанні миттєвої частоти як інформативного параметра буде забезпечуватися лише при її оцінці в точці фазової характеристики, що має найбільшу відмінність у дефектній та бездефектній зонах контрольованого зразка. Така ситуація може ускладнити вибір відповідного часового інтервалу в процесі створення методики контролю.

Для більш якісної оцінки впливу дефекту на фазочастотну характеристику інформаційного сигналу можна виконати інтегрування фазової характеристики на вибраному інтервалі T та використати отриману величину Fa як інформативний параметр:

$$Fa = \int_{t_1}^{t_2} \theta(t) dt.$$

Використання цього параметра дає змогу спростити вибір часового проміжку $[t_2 - t_1]$, на якому відбувається розрахунок інформативного параметра. Точка t_1 може покладатися за нульовий відлік реалізації фазової характеристики, в той час як t_2 може бути вибрана експериментально, виходячи з міркувань забезпечення максимальної чутливості за найменшої кількості випадкових викидів, спричинених різкими стрибками фази. Також t_1 і t_2 можуть встановлюватися таким чином, щоб охопити область найбільшої відмінності між фазовими характеристиками інформаційних сигналів з дефектної та доброякісної областей об'єкта контролю. Крім того, ступінь відмінності між реалізаціями інформаційних сигналів, отриманих із різних областей об'єкта контролю,

може бути визначений на основі дослідження фазової характеристики на всьому часовому інтервалі існування сигналу.

Алгоритм дослідження

Пропонується такий алгоритм дослідження. На першому етапі з бездефектної області отримуємо реалізацію інформаційного сигналу, для якого розраховуємо еталонну фазову характеристику $\theta_1(t)$. Далі розраховуємо різницю між $\theta_1(t)$ та $\theta_2(t)$, яку отримуємо з поточної області сканування об'єкта. Відмінність отриманої різницевої характеристики буде тим більшою, чим більше відрізняються фізико-механічні характеристики контрольованої зони. На рис. 2 наведено різницю фазових характеристик для бездефектної та дефектної областей зразка КМ.

Як видно з наведеного рисунка, математичне сподівання та дисперсія різниці значно більші для характеристики, отриманої з дефектної області, ніж з бездефектної.

Як інформативний параметр, що характеризує ступінь відмінності фазових характеристик, також пропонується використовувати параметр Fb , який розраховується як інтеграл їх різниці:

$$Fb = \int_{t_1}^{t_2} [\theta_2(t) - \theta_1(t)] dt.$$

Принцип вибору границь t_1 і t_2 аналогічний критерію Fa . Еталонна фазова характеристика $\theta_1(t)$ розраховується на основі усередненого сигналу, отриманого із реалізацій з різних ділянок бездефектної області зразка.

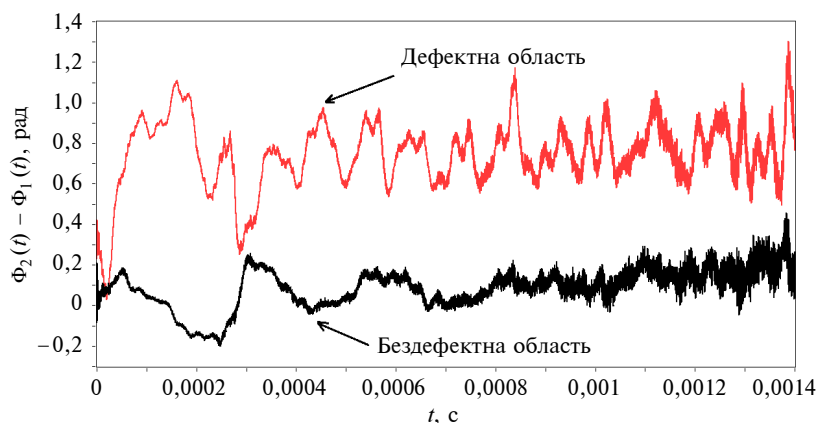


Рис. 2. Часові представлення різниці між еталонною та поточними реалізаціями фазових характеристик інформаційних сигналів

Обговорення результатів експериментального дослідження

Задачею проведеного експериментального дослідження було визначення достовірності контролю, що може бути досягнута за допомогою введених додаткових діагностичних ознак. Для порівняння якості виявлення дефекту з використанням вибраних інформативних параметрів було проведено оцінку їх достовірності при контролі фрагмента виробу з КМ.

Зразок являв собою стільникову панель товщиною 20 мм із заповнювачем типу ПСП-1-2,5 з обшивкою на основі вуглепластика ЕЛУР-П-0,1 та клею ВК 41. Дефект моделювався зоною порушення зв'язку між обшивкою та стільниковим заповнювачем. Обшивка з боку дефектної області не мала візуальних ознак пошкодження з протилежного — була відновлена наклеюванням фрагмента вуглепластика аналогічного типу.

У процесі дослідження проводилося сканування поверхні зразка з боку, протилежного до зони відновлення обшивки по лінії, що проходила через центр дефекту. Як датчик механічного імпедансу використовувався роздільно-суміщений перетворювач типу РС-1, який застосовується як стандартний для дефектоскопів типу ДАМІ-С виробництва компанії ВОТУМ.

Для кожного стану контрольованої області було отримано по 1000 реалізацій інформативних сигналів перетворювача, за якими визначені оцінки інформативних параметрів, описаних вище. На рис. 3 наведено емпіричні розподіли інформативних параметрів амплітуди U , миттєвої частоти f_0 та інтегралу Fa фазової характеристики.

Як видно з наведених результатів, зона перетину законів розподілу для амплітуди значно перевищує її для параметрів f_0 та Fa , що свідчить про потенційно нижчу достовірність контролю.

У процесі дослідження достовірність оцінювалася на основі використання порогового рівня за вибраним параметром, розрахованим із використанням методу Неймана–Пірсона. Як

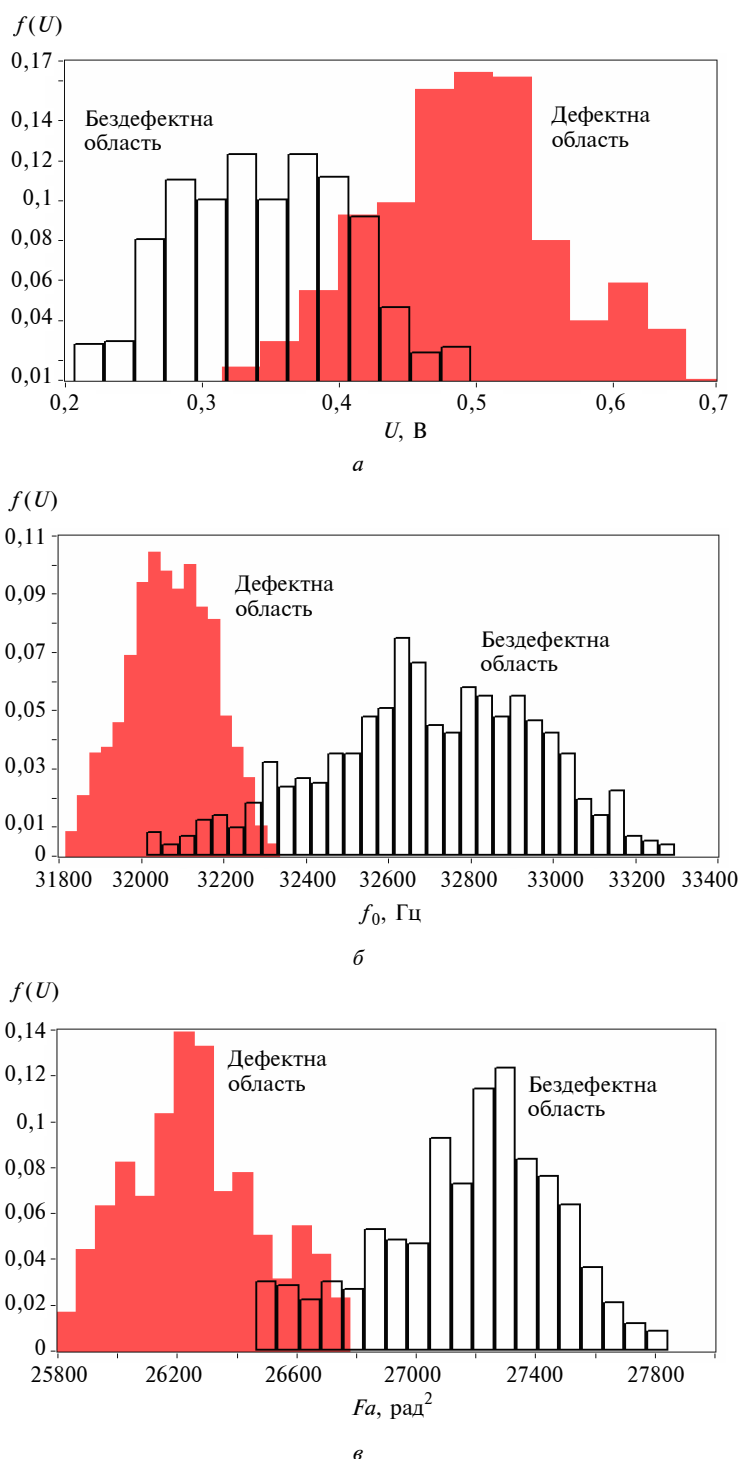


Рис. 3. Емпіричні закони розподілу інформативних параметрів: *a* — амплітуди сигналу; *b* — миттєвої частоти; *v* — інтегралу фазової характеристики

вихідні дані використано вибірки інформативних параметрів, одержаних із дефектних та бездефектних областей об'єкта контролю. Значення достовірності контролю для досліджуваного зразка наведені в таблиці.

Таблиця. Порівняння оцінок достовірностей контролю для вибраних інформативних параметрів

Інформативний параметр	U	f_0	Fa	Fb
Достовірність контролю, %	73	91	93	96

Примітка. U – типовий параметр, f_0 , Fa , Fb – запропоновані параметри.

Як видно із наведених даних, параметр U , тобто амплітуда сигналу, має найнижчу достовірність у разі його використання як інформативного при прийнятті діагностичних рішень. Найвища достовірність реалізується із використанням параметра Fb , або інтегралу різниці кумулятивних фаз еталонного та поточного сигналів. З урахуванням того, що обробка інформативного сигналу з первинного перетворювача в сучасних імпедансних дефектоскопах реалізується на програмному рівні, розрахунок інтеграла кумулятивної фази та інтеграла різниці кумулятивних фаз поточного й еталонних сигналів може бути порівняно простим у вигляді підпрограми, доданої до існуючого програмного забезпечення. Це своєю чергою дасть можливість підвищити загальну достовірність контролю імпульсним імпедансним методом.

Висновки

КМ набули широкого використання у технологічних процесах виробництва елементів конструкцій сучасних авіакосмічних апаратів. Для контролю зміни фізико-механічних характеристик цих конструкцій використовується велика кількість методів, серед них і імпедансний ме-

тод, який внесено до керівництва з технічної експлуатації низки літальних апаратів. У процесі контролю стану конструкцій як інформативний параметр традиційно використовують амплітуду, фазу або спектр сигналу акустичного перетворювача. Однак ці параметри можуть бути чутливі до різноманітних завад, що збільшує імовірність випадкових спрацювань. Крім того, вони мають різну чутливість до дефектів різного типу. Таким чином, актуальною задачею є збільшення числа інформативних параметрів, що мають високу чутливість до можливих дефектів.

Використання перетворення Гілберта дало змогу отримати додаткові параметри сигналів, що несуть інформацію про технічний стан виробу. Запропоновані інформативні параметри, такі як миттєва частота інформаційного сигналу, інтеграл фазової характеристики на вибраному інтервалі та інтеграл різниці фазових характеристик інформаційних сигналів, отриманих від дефектної та бездефектної областей, дають можливість підвищити загальну достовірність контролю імпульсним імпедансним методом. Експериментально доведено, що використання традиційного інформативного параметра – амплітуди сигналу, дає достовірність контролю у 73 %. У той же час, використання запропонованого інтегралу різниці кумулятивних фаз еталонного та поточного сигналів забезпечує найвищу достовірність – 96 %.

До перспективних досліджень у цьому напрямі можна віднести розвідку можливостей застосування запропонованої методики для підвищення інформативності методів контролю матеріалів різних типів.

Список літератури

1. Протасов А.Г., Юрченко О.С. Влияние параметров сотовой конструкции на выявляемость дефектов при контроле импедансным методом // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 3. – С. 48–51.
2. Азаров Н.Т., Сырбу В.Н. Контроль клееных сотовых конструкций самолетов импедансным дефектоскопом ДАМИ-С // В мире неразрушающего контроля. – 2003. – № 3. – С. 16–29.
3. Мурашов В.В. Контроль монолитных и клееных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическим импедансным методом // Авиационная промышленность. – 2009. – № 3. – С. 43–48.
4. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы неразрушающего контроля многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
5. Giurgiutiu V., Rogers C.A. Recent advancements in the electro-mechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and NDE // Proc. SPIE Conf. Smart Structures and Materials, San Diego, CA. – 1998. – 3329. – P. 536–547.
6. Lange Yu.V. The mechanical impedance analysis method of nondestructive testing (a review) // Nondestruct. Test. Eval. – 1994. – 2. – P. 177–193.
7. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустическим импедансным методом // Клеи. Герметики. Технологии. – 2010. – № 3. – С. 13–26.

8. Бакунов А.С., Мурашов В.В., Сысоев А.М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 6. – С. 72–74.
9. Мурашов В.В. Выявление зон отсутствия адгезионного соединения слоев в многослойных конструкциях // Клеи. Герметики. Технологии. – 2013. – № 3. – С. 13–26.
10. A review of optimization techniques used in the design of fiber composite structures for civil engineering applications / Z.K. Awad, T. Aravinthan, Y. Zhuge et al. // Materials and Design. – 2012. – 33, № 1. – P. 534–544.
11. Мурашов В.В. Контроль многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2011. – № 10. – С. 17–23.
12. Baldev R., Jayakumar T., Thavasimuthu M. Practical Non-destructive Testing. – 2nd ed. – New Delhi: Narosa Publishing House, 2002. – 186 p.
13. Бендат Дж., Парсол А. Прикладной анализ случайных данных / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

References

1. A.G. Protasov et al., “Influence of honeycomb construction parameters on defect detectability at the impedance method of testing”, *Tekhnicheskaja Diagnostika i Nerazrushajushhij Kontrol'*, no. 3, pp. 48–51, 2006 (in Russian).
2. N.T. Azarov et al., “Inspection of glued honeycomb constructions of airplanes by the impedance defectoscope DAMI-S”, *V Mire Nerazrushajushhego Kontrolja*, no. 3, pp. 16–19, 2003 (in Russian).
3. V.V. Murashov, “Inspection of monolithic and glued constructions made of polymeric composite materials by the acoustic impedance method”, *Aviacionnaja Promyshlennost'*, no. 3, pp. 43–48, 2009 (in Russian).
4. Yu.V. Lange, *Acoustic Low-Frequency Nondestructive Methods of Multi-Layer Constructions Testing*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1991, 272 p. (in Russian).
5. V. Giurgiutiu and C. A. Rogers, “Recent advancements in the electro-mechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and NDE”, in *Proc. SPIE Conf. Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, vol. 3329, pp. 536–547, 1998.
6. Yu.V. Lange, “The mechanical impedance analysis method of nondestructive testing (a review)”, *Nondestr. Test. Eval.*, vol. 2, pp. 177–193, 1994.
7. V.V. Murashov, “Inspection of glued constructions by the acoustic impedance method”, *Klei. Germetiki. Tehnologii*, no. 3, 2010, pp. 13–26 (in Russian).
8. A.S. Bakunov et al., “Inspection of propeller blades by low-frequency acoustic means”, *Kontrol'. Diagnostika*, no. 6, pp. 72–74, 2012 (in Russian).
9. V.V. Murashov, “Detection of zones of lack adhesive junction layers in multi-layer constructions”, *Klei. Germetiki. Tehnologii*, no. 3, pp. 13–26, 2013 (in Russian).
10. Z.K. Awad et al., “A review of optimization techniques used in the design of fiber composite structures for civil engineering applications”, *Materials and Design*, vol. 33, no. 1, pp. 534–544, 2012.
11. V.V. Murashov, “Inspection of multi-layer glued constructions made of polymeric composite materials”, *Klei. Germetiki. Tehnologii*, no. 10, pp. 17–23, 2011 (in Russian).
12. R. Baldev et al., *Practical Non-destructive Testing*, 2nd ed. New Delhi, India: Narosa Publishing House, 2002, 186 p.
13. Dzh. Bendat and A. Parsol, *Application Study of the Random Data*. Moscow, USSR: Mir, 1989, 540 p. (in Russian).

Є.Ф. Суслов, В.С. Єременко, А.Г. Протасов, Ж.О. Павленко

ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГІЛБЕРТА ДЛЯ ОТРИМАННЯ ДОДАТКОВИХ ІНФОРМАТИВНИХ ОЗНАК ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ ІМПЕДАНСНОМУ КОНТРОЛІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Проблематика. Стаття присвячена проблемі підвищення інформативності акустичного імпедансного методу неруйнівного контролю, який є одним із найбільш розповсюджених методів, що використовуються в авіації при контролі панелей зі стільниковим заповнювачем і багатощарових конструкцій, виконаних із композиційних матеріалів.

Мета дослідження. Отримання додаткових інформативних ознак для імпульсного імпедансного методу контролю, які б підвищили достовірність контролю стану композиційних матеріалів.

Методика реалізації. Для досягнення поставленої мети було експериментально отримано на тестовому зразку сигнали перетворювача від дефектної та бездефектної областей. Використання перетворення Гілберта дало змогу визначити фазові характеристики цих сигналів і провести їх демодуляцію з метою виділення низькочастотної обвідної для аналізу її форми.

Результати дослідження. Отримано інформативні параметри, такі як миттєва частота сигналу, інтеграл фазової характеристики на вибраному інтервалі та інтеграл різниці фазових характеристик сигналів. Для порівняння якості виявлення дефекту з використанням вибраних параметрів було проведено оцінку достовірності результату контролю для фрагмента виробу з композиційного матеріалу.

Висновки. Запропоновані інформативні параметри, які характеризують ступінь відмінності фазових характеристик, дають можливість підвищити загальну достовірність контролю композиційних матеріалів імпульсним імпедансним методом.

Ключові слова: імпедансний метод контролю; перетворення Гілберта.

Е.Ф. Суслов, В.С. Еременко, А.Г. Протасов, Ж.А. Павленко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ИМПЕДАНСНОМ КОНТРОЛЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проблематика. Статья посвящена проблеме повышения информативности акустического импедансного метода неразрушающего контроля, который является одним из наиболее распространенных методов, используемых в авиации при контроле панелей с сотовым заполнением и многослойных конструкций, выполненных из композиционных материалов.

Цель исследования. Получение дополнительных информативных признаков для импульсного импедансного метода контроля, которые бы повысили достоверность контроля состояния композиционных материалов.

Методика реализации. Для достижения поставленной цели были экспериментально получены на тестовом образце сигналы преобразователя от дефектной и бездефектной областей. Использование преобразования Гильберта позволило определить фазовые характеристики этих сигналов и провести их демодуляцию с целью выделения низкочастотной огибающей для анализа ее формы.

Результаты исследования. Получены информативные параметры, такие как мгновенная частота сигнала, интеграл фазовой характеристики на выбранном интервале и интеграл разности фазовых характеристик сигналов. Для сравнения качества выявления дефекта с использованием выбранных параметров была проведена оценка достоверности результатов контроля для фрагмента изделия из композиционного материала.

Выводы. Предложенные информативные параметры, которые характеризуют степень отличия фазовых характеристик, позволяют повысить общую достоверность контроля композиционных материалов импульсным импедансным методом.

Ключевые слова: импедансный метод контроля; преобразование Гильберта.

Рекомендована Радюю
приладобудівного факультету НТУУ
“КПІ”

Надійшла до редакції
9 грудня 2015 року